

A

Causality, Locality, and Probability in Quantum Theory

című akadémiai doktori értekezés tézisei

Szabó Gábor

MTA BTK Filozófiai Intézet

I. Előzmények és célok

A kvantumelmélet filozófiai alapjainak megértése a modern tudományfilozófia egyik legizgalmasabb kérdése. Mit mondanak a fundamentális fizikai elméleteink az olyan alapvető filozófiai fogalmakról, mint a kauzalitás, a lokalitás vagy a valószínűség? Hogyan járul hozzá a filozófiai alapfogalmak elemzése az elméletek mélyebb megértéséhez?

A kvantumelmélet filozófiájának egyik, a kezdetektől fogva meghatározó interpretációs törekvése abban állt, hogy az elméletet beillesse egy ún. *lokális realista* világképbe. Ez az értelmezés onnan kapta a nevét, hogy elfogadta egyrészt az események klasszikus, boole-i ontológiáját, másrészt az események elhelyezhetőségét a téridő valamely régiójában, végül a speciális elméletnek a kauzalitásra vonatkozó korlátozó előírásait. Röviden, a lokális realista interpretáció klasszikus és lokálisan kauzális.

A lokális realista értelmezés viszonyát a kvantumelmülethez először John Bell tanulmányozta a hatvanas években. Bell legfőbb érdeme abban állt, hogy képes volt megragadni és kezelhető matematikai formába önteni a lokális kauzalitás fogalma mögött álló változatos fizikai intuíciókat. Bell egyúttal arra is rámutatott, hogy a lokális realista interpretációk összeegyeztethetetlenek a kvantumelmélettel. Az inkompatibilitásra rámutató egyenlőtlenségeit nevezzük Bell-egyenlőtlenségeknek.

Doktori értekezésem vizsgálódásai ebben a Bell-féle gondolatkörben mozognak. Dolgozatomban annak a kérdésnek igyekeztem utána járni, hogy a Bell-féle lokális kauzalitás-fogalom hogyan fogalmazható meg a lokális fizikai elméletek paradigmájában, hogyan használható fel ezután kvantumkorrelációk magyarázatára, milyen viszonyban áll a Bell-féle definíció a kvantumtérelmélet és az egyéb formális elméletek lokalitási és kauzalitási fogalmaival és elveivel, úgymint a reichenbach-i közös ok elvvel, a kauzális Markov-tulajdonsággal, a d-szeparációval etc., és végül hogyan viszonyul a lokális kauzalitás a Bell-egyenlőtlenségekhez.

II. Források és módszerek

A fenti kérdések megválaszolásához számos egyéb mellékproblémát kellett tisztázni. Egyfelől meg kellett vizsgálni a valószínűségi levezetésekben ismételt megjelenő ún. konspirációmentesség fogalmát és általános szerepét a fizikai elméletekben. Tisztázni kellett továbbá a kvantumvalószínűségek interpretációját és elhelyezkedését a tágabb valószínűségelméleti keretek között. A lokális kauzalitás Bell-féle definíciójához meg kellett világítani az ún. leárnyékoló tartományok helyzetét, és értelmezni kellett az ún. teljes specifikáció fogalmát. Végül a közös ok elvvel kapcsolatban meg kellett érteni az együttes illetve a külön közös ok típusú kauzális magyarázatok viszonyát. Dolgozatomban ennek a szerteágazó, mégis a kauzalitás, a lokalitás és a valószínűség kvantumelméleti fogalma körül gyűrűző problémakörnek kívántam a mélyére hatolni.

Az értekezés két részre tagolódik. Az 1-3. fejezetek elfogadják a lokális realizmus alapfeltevéseit, és a hume-i tradíció szellemében ragaszkodnak mind az események klasszicitásához, mind mozaikszerű elrendezhetőségükhöz a téridőn. Ennyiben az első rész egy hagyományosabb tárgyalásmódba illeszkedik.

A dolgozat második fele (4-10. fejezet) ezzel szemben igyekszik kiterjeszteni a Bell-féle programot a nem-kommutatív események irányába, és mint ilyen egy progresszívabb kutatási irányt követ. A központi kérdés röviden a következő: A Bell-egyenlőtlenségek fényében lehetséges-e megőrizni a lokális kauzalitás fogalmát azon az áron, hogy feladjuk az ontológia klasszicitását? Más szóval, a kvantumelmélet standard interpretációi mellett – ahol is a klasszikus ontológia megőrzése olyan magyarázatokhoz vezet, amelyek vagy nem lokálisak, vagy nem kauzálisak, vagy egyéb nemkívánatos tulajdonságokkal rendelkeznek – lehetséges-e kidolgozni egy olyan interpretációit, amely feladja ugyan a klasszicitást és az ehhez szorosan kapcsolódó kommutativitást, de továbbra is lokálisan kauzális marad? A nem-kommutativitás a kvantumelmélet formalizmusának integráns része, a kauzalitásban betöltött szerepe azonban teljesen feltáratlan. Nem-kommutatív struktúrák bevonása a kauzális magyarázatainkba egyaránt hozzájárulhat a formális stratégiák kibővüléséhez és egyben segíthet elmélyíteni a kauzalitás nem-klasszikus természetének megértését a kvantumelméletben.

III. Legfontosabb eredmények

Az értekezés alábbi tételei rendre a disszertációnak lentebb, a IV. fejezetben felsorolt cikkekre épülő fejezeteinek központi állításait tükrözik.

Az 1. fejezet témája a kvantummechanika rekonstrukciója klasszikus feltételes valószínűségek segítségével, amelyek mérési kimeneteket mérésválasztásokra történő kondíciójának valószínűségét adják meg. A fejezetben megvizsgáltam, hogy a feltételes valószínűségek kvantummechanikai reprezentációja hogyan helyezkedik el a nem-kommutatív reprezentációk tágabb körében. Ebből a célból adottnak vettem a kvantumformalizmus egy részét, majd pedig megvizsgáltam, hogy az empirikus adatok előírják-e a fennmaradó rész számára, hogy az megfeleljen a kvantummechanikának. Végül megmutattam:

- 1. tézis.** *A feltételes valószínűségek nem-kommutatív reprezentációinak tágabb köre az empirikus adatok számának növekedtével a kvantummechanikai reprezentációra szűkül.*

A 2. fejezet a kvantumelmélet alapjaihoz fűződő legnevezetesebb elvek viszonyára vet fényt. A fejezetben összevetettem három, korrelációk kauzális magyarázatára használt elvet: a reichenbachi közös ok elvet, Bell lokális kauzalitási elvét, valamint Einstein realitáskritériumát. Megmutattam, hogy a Bell-egyenlőtlenségekhez két út vezet: A reichenbachi közös ok elv és Bell lokális kauzalitási elve esetében egy nem-konspiratív együttes közös okot tételezünk fel a korrelációkhoz. Einstein realitáskritériuma ellenben egy erősen nem-konspiratív külön közös okra épít. Szigorú korrelációk erősen nem-konspiratív külön közös okai azonban egyben nem-konspiratív együttes közös okok is. Így:

- 2. tézis.** *A kvantumelmélet három nagy elve, a reichenbachi közös ok elv, a Bell-féle lokális kauzalitási elv, valamint Einstein realitáskritériuma a Bell-egyenlőtlenségekhez vezető úton egymásba torkollik.*

A 3. fejezet az ún. konspirációmentesség fogalmát tárgyalja. A konspirációmentesség az a követelmény, hogy a mérésválasztások legyenek valószínűségi függetlenek a mérési kimenetekért felelős realitáselemektől. Ebben a fejezetben megmutatom, hogy:

- 3. tézis.** *A konspirációmentesség fontos szerepet tölt be a fizikai elméletekben, befolyásolja az elmélet eseménytípusainak szemantikai szerepét, és szoros kapcsolatban áll a szeperabilitás, kompatibilitás, kauzalitás, lokalitás és kontextualitás fogalmával.*

A 4–6. fejezetek témaja Bell lokális kauzalitásfogalma. Itt arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a lokális kauzalitás hogyan viszonyul a kauzális Markov-tulajdonsághoz, a d-szeperációhoz, és vajon a lokális kauzalitás definíciójában szereplő teljes specifikáció ellentmondásban áll-e a konspirációmentességgel.

A 4. fejezet a Bell-féle lokális kauzalitási elvet a kauzális Markov-tulajdonsághoz viszonyítja. Ebből a célból bevezetünk egy olyan fogalmi keretet, amely egy közös formalizmusban képes integrálni a téridőbeli és a valószínűségi entitásokat. Ebben az ún. lokális fizikai elméletben definiáltuk Bell lokális kauzalitási elvét, valamint a markovitást. Majd egy egyszerű stochasztikus modellen megmutattuk, hogy egy diszkrét lokális fizikai elmélet hogyan megy át egy Bayes-hálóba, valamint, hogy:

- 4. tézis.** *A kauzális Markov-tulajdonság a Bell-féle lokális kauzalitási elvnek speciális esete diszkrét lokális fizikai elméletekben.*

Az 5. fejezet célja Bell lokális kauzalitási elvének motivációja Bayes-hálók segítségével. Egy lokálisan kauzális elméletben minden superluminális korreláció leárnyékolható olyan atomi eseményekkel, amelyek a korreláló események hátrafényképének ún. leárnyékoló régióiban találhatók. Egy Bayes-hálóban bármely nem-leszármazotti viszonyban álló véletlen változók közötti korreláció leárnyékolható véletlen változók ún. d-szeperáló halmazával. Megmutatható, hogy:

5. tétel. *A lokális kauzalitás definíciójában szereplő leárnnyékoló régiók egy jól körülhatárolható értelemben megfelelnek a Bayes-hálók d-szeparáló halmazainak.*

Egy fizikai elmélet lokálisan kauzális, ha térszerűen szeparált események közötti bármely korreláció leárnnyékolható olyan lokális eseményekkel, amelyek úgymond *teljesen specifikálják* az események múltjának egy jól meghatározott régióját. A 6. fejezetben megmutatjuk, hogy:

6. tétel. *Seevinck and Uffink (2011) állításával ellentétben a teljes specifikáció nem áll ellentmondásban a konspirációmentesség (szabad változó) feltétellel.*

A 7. fejezetben amellet érvelünk, hogy nem-kommutatáló közös okok adaptálása a kvantumkorrelációk kauzális magyarázatába a következő két előnnyel is jár: segít érvényben tartani a reichenbachi közös ok elvet, valamint lokális közös ok típusú magyarázat szolgáltat olyan korrelációkhoz, amelyek sértik a Bell-egyenlőtlenségeket. Vagyis:

7. tétel. *Kvantumkorrelációk kauzális magyarázatában érdemes a közös ok fogalmát kiterjeszteni ún. nem-kommutatáló közös okokra.*

A fejezetben diszkutáljuk a nem-kommutatáló közös okok bevezetésével járó hátrányokat is.

A 8. fejezetben a közös ok standard valószínűségi karakterizációját (amelyet a Bell-egyenlőtlenségek levezetésében használunk) hasonlítjuk össze Bell lokális kauzalitásfogalmával egy ún. izotón folyam keretein belül, amelyet az algebrai kvantumtérelméletből kölcsönözünk. Bell definíciójának két komponensének logikai szerepét vizsgáltuk meg:

8. tétel. *A közös ok a korreláló események múltjának metszetében helyezkedik el, valamint a metszetrégiónak teljes specifikációját nyújtja.*

A 9. fejezetben azt a kérdést teszem fel, hogy hogyan viszonyul egymáshoz az alábbi két tény: (i) korrelációk egy halmazra rendelkeznek lokális, konspirációmentes külön közös ok típusú magyarázattal, (ii) a halmaz kielégíti a Bell-egyenlőtlenségeket. Válaszom részleges: megmutatom, hogy:

9. tétel. *Az ún. Clauser-Horne-egyenlőtlenségeket sértő korrelációkhoz nem adható lokális konspirációmentes külön közös ok, ha a model determinisztikus.*

A disszertáció 10. fejezete ismét az ún. külön közös okrendszer szerepét vizsgálja. Az EPR-szituáció standard közös ok típusú magyarázatai egy ún. együttes közös okrendszert tételeznek fel. Az együttes okrendszer feltételezése olyan egyéb fizikailag jól motivált feltételekkel együtt, mint a lokalitás vagy a konspirációmentes a Bell-egyenlőtlenségekhez vezet. Mivel a Bell-egyenlőtlenségek megfelelő mérésválasztások mellett sérülnek, ezért az EPR szituáció lokális, konspirációmentes együttes közös okrendszeres magyarázata kizárható. De miért tesszük fel, hogy a közös okos magyarázat abban áll, hogy az összes korrelációhoz ugyanazt a közös okot találjuk, miért nem lehet a különböző korrelációknak külön közös oka? Milyenek tehát az EPR-szituáció külön közös okrendszerrel történő magyarázatának a kilátásai, és hogyan viszonyul ez a magyarázat a Bell-egyenlőtlenségekhez?

10. tétel. *Az EPR-szituáció külön közös okrendszerrel történő magyarázatának általános viszonya a Bell-egyenlőtlenségekhez nem tisztázott.*

IV. Publikációk

A doktori értekezés alapjául szolgáló tanulmányok a következők:

1. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Quantum mechanics as a representation of classical conditional probabilities," *Journal of Mathematical Physics* (submitted).
2. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Three principles leading to the Bell inequalities," *Belgrade Philosophical Annual*, **29**, 57-66 (2016).
3. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "How man and nature shake hands: the role of no-conspiracy in physical theories," *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, **57**, 89-97 (2017).
4. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Relating Bell's local causality to the Causal Markov Condition," *Foundations of Physics* **45** (9), 1110-1136 (2015).
5. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Bell's local causality is a d-separation criterion," *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics* (forthcoming).
6. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Local causality and complete specification: a reply to Seevinck and Uffink," in U. Mäki et al. (eds), *Recent Developments in the Philosophy of Science: EPSA13* Helsinki, Springer Verlag, 209-226 (2015).
7. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Noncommutative causality in algebraic quantum field theory," in M. C. Galavotti, D. Dieks, W. J. Gonzalez, S. Hartmann, Th. Uebel, M. Weber (eds.), *The Philosophy of Science in a European Perspective*, Vol. 5., 543-554 (2014).
8. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "On the relation between the probabilistic characterization of the common cause and Bell's notion of local causality," *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, **49**, 32-41 (2015).
9. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "Separate common causal explanation and the Bell inequalities," *International Journal of Theoretical Physics*, **51**, 110-123 (2012).
10. **fejezet** Gábor Hofer-Szabó, "EPR correlations, Bell inequalities and common cause systems," in D. Aerts, S. Aerts and C. de Ronde (eds.), *Probing the Meaning of Quantum Mechanics: Physical, Philosophical and Logical Perspectives*, 263-277 (2014).